BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015 ruduo
I paskaita

Turinys

Turinys

Literatūra

- B.Kaulakys, Branduolinės energetikos fizikiniai pagrindai (Paskaitų konspektas), I dalis, 103 psl. (12 lentelių, 50 paveikslų, 4 priedai), Vilniaus universitetas, 2001.

  http://spektras.itpa.lt/~bronius/BrandFiz/
- H.Horodničius, Branduolio fizika, VU, 1997.
- Atomo ir branduolio fizikos laboratoriniai darbai. Parenge A.Poškus, Vilnius, VU, 2003.
- Paskaitų skaidrės:

  http://web.vu.lt/ff/v.pyragaite/

  Skyrelis BEFP

Turinys

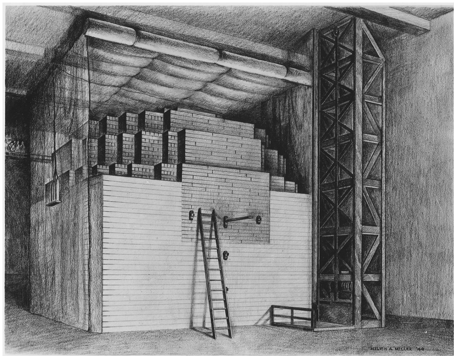
Įvadas. Branduolinė energetika

- Branduolinė energetika – tai intensyvios ir sparčios XX amžiaus mokslo ir technologijų plėtros rezultatas. Ji nuėjo ilgą ir prieštaringą raidos kelią.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Branduolinė energetika – tai intensyvios ir sparčios XX amžiaus mokslo ir technologijų plėtros rezultatas. Ji nuėjo ilgą ir prieštaringą raidos kelią.
- Branduolinės energetikos pradžia galima laikyti 1942 metus, kai italų fiziko Enriko Fermio (Fermi) vadovaujamas internacionalinis mokslininku kolektyvas Čikagos (JAV) universiteto stadione paleido pirmąjį branduolinį reaktoriu CP-1 (Chicago Pile-1). Pirmasis branduolinis užtaisas buvo susprogdintas tiktai praėjus trejiems metams po pirmojo reaktoriaus paleidimo, irgi JAV, Naujosios Meksikos valstijos dykumoje, Los Alamos vietovėje 1945 m. liepos 16 d. Kodinis testinio sprogimo pavadinimas: Trinity. 1945 rugpjūčio 9 d. buvo detonuota bomba virš Nagasaki, Japonija.

Įvadas. Branduolinė energetika



CP-1 eksperimentinis reaktorius (1942)



Trinity sprogimas (1945)
16 ms po detonacijos.
Aukščiausias taškas: 200 m.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Europoje pirmąjį branduolinį reaktorių sukonstravo I.Kurčiatovo vadovaujama Sovietų Sąjungos mokslininkų grupė 1946 m.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Europoje pirmąjį branduolinį reaktorių sukonstravo I.Kurčiatovo vadovaujama Sovietų Sąjungos mokslininkų grupė 1946 m.
- Pirmoji eksperimentinė 5 MW elektrinės galios atominė elektrinė ėmė veikti 1954 m. Obninske netoli Maskvos (uranas), o pirmoji pramoninė 60 MW galios atominė elektrinė buvo paleista 1956 m. Kolder Holyje (Calder Hall), Anglijoje. Pastarosios pirminis tikslas buvo gaminti plutonį branduoliniam ginklui, antrinis tikslas buvo elektros energija.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Europoje pirmąjį branduolinį reaktorių sukonstravo I.Kurčiatovo vadovaujama Sovietų Sąjungos mokslininkų grupė 1946 m.
- Pirmoji eksperimentinė 5 MW elektrinės galios atominė elektrinė ėmė veikti 1954 m. Obninske netoli Maskvos (uranas), o pirmoji pramoninė 60 MW galios atominė elektrinė buvo paleista 1956 m. Kolder Holyje (Calder Hall), Anglijoje. Pastarosios pirminis tikslas buvo gaminti plutonį branduoliniam ginklui, antrinis tikslas buvo elektros energija.
- Pirmasis greitųjų neutronų (plutonio) reaktorius buvo sukonstruotas Los Alamos vietovėje (JAV) 1946 m. (kodinis pavadinimas Clementine), o pirmasis komercinis greitųjų neutronų reaktorius (bryderis - angl. breeder) pradėjo veikti Prancūzijoje 1974 m (Phénix).

Įvadas. Branduolinė energetika

- 2000 metais 33 pasaulio valstybėse veikė 433 energetiniai branduoliniai reaktoriai, dar 46 buvo statomi arba projektuojami.
  - JAV – 109 reaktoriai,
  - Prancuzija – 55,
  - Japonija – 51,
  - Anglija – 35.

Įvadas. Branduolinė energetika

- 2000 metais 33 pasaulio valstybėse veikė 433 energetiniai branduoliniai reaktoriai, dar 46 buvo statomi arba projektuojami.
  - JAV – 109 reaktoriai,
  - Prancuzija – 55,
  - Japonija – 51,
  - Anglija – 35.
- Bendra veikiančiųjų reaktorių elektrinė galia siekė beveik $3,5 \cdot 10^5$ MW. Vis dėlto tai tesudaro mažiau 5 proc. visų pasaulio energetinių poreikių.

Įvadas. Branduolinė energetika

Pasaulyje maždaug po 25 proc. pirminės energijos suvartojama:

- elektros energijos gamybai,
- pastatams šildyti,
- pramonės reikmėms,
- transportui

Įvairios kuro rūšys energetikos struktūroje pasiskirsto maždaug taip:

- akmens anglis - 46%,
- nafta - 27%,
- dujos - 22%,
- kitos (urano, saulės, vėjo, geoterminės ir kt.) - 5%.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Apskaičiavimai rodo, kad jau XXI pabaigoje didžioji dalis organinio kuro atsargų bus išsemtos. Organinis kuras nuolat brangsta, tampa vis sudėtingesni jo gavybos procesai, nauji telkiniai surandami vis giliau ir sunkiau prieinamose planetos vietovėse. Be to, organines medžiagas tikslinga naudoti ne kaip kurą, o kaip chemijos pramonės žaliavas.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Apskaičiavimai rodo, kad jau XXI pabaigoje didžioji dalis organinio kuro atsargų bus išsemtos. Organinis kuras nuolat brangsta, tampa vis sudėtingesni jo gavybos procesai, nauji telkiniai surandami vis giliau ir sunkiau prieinamose planetos vietovėse. Be to, organines medžiagas tikslinga naudoti ne kaip kurą, o kaip chemijos pramonės žaliavas.
- Branduolinė energetika žymiai sumažina organinio kuro dalį elektros energijos gamyboje. Jeigu 2000 MW galios termofikacinė elektrinė sudegina apie 25000 tonų akmens anglies per parą, tai du 1000 MW galios branduoliniai reaktoriai suvartoja tiktai apie 20 tonų branduolinio kuro per metus.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Iš pirminės energijos šaltinių struktūros matyti, kad netgi jei visą elektros energiją gamintų atominės elektrinės, apie 75% likusių energijos poreikių vis vien tektų organiniam kurui. Tai tik padėtų taupyti organinį kurą, bet neišspręstų problemos iš esmės. Išeitis gali būti – branduolinių reaktorių panaudojimas ne tiktai elektros energetikoje, bet ir pramonėje, transporte, gamyboje, šilumos tiekimo įmonėse. Branduoliniai reaktoriai montuojami laivuose, kosminiuose aparatuose ir kitur.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Iš pirminės energijos šaltinių struktūros matyti, kad netgi jei visą elektros energiją gamintų atominės elektrinės, apie 75% likusių energijos poreikių vis vien tektų organiniam kurui. Tai tik padėtų taupyti organinį kurą, bet neišspręstų problemos iš esmės. Išeitis gali būti – branduolinių reaktorių panaudojimas ne tiktai elektros energetikoje, bet ir pramonėje, transporte, gamyboje, šilumos tiekimo įmonėse. Branduoliniai reaktoriai montuojami laivuose, kosminiuose aparatuose ir kitur.
- Tačiau sunkiųjų branduolių dalijimosi metu išsiskirianti energija iš esmės problemos neišspręs: šiuo metu žinomi branduolinio kuro ištekliai gali aprūpinti tik keliasdešimt kartų didesniu energijos kiekiu negu tradicinio kuro ištekliai. Be to, Černobylio (Ukraina, 1986) atominės elektrinės katastrofa pakirto žmonijos pasitikėjimą branduolinių reaktorių saugumu.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Šiais požiūriais yra pranašesni energijos šaltiniai, pagrįsti lengvųjų branduolių sintezės metu išsiskiriančia energija. Vandenilio ir jo sunkiųjų izotopų gamtoje yra labai daug. Tačiau nėra paprasta sukurti energetiškai naudingą valdomą branduolinės sintezės reakciją. Perspektyviausia yra sunkiųjų vandenilio izotopų deuterio ir tričio virtimo heliu reakcija. Deja, paaiškėjo, kad šis energijos šaltinis yra už devynių užraktų – branduolinė sintezė vyksta tik pakaitinus deuterio ir tričio mišinį iki maždaug 100 milijonų laipsnių. Todėl tokia reakcija ir vadinama termobranduoline sinteze. Iškyla problema, kur ir kaip įkaitinti ir išlaikyti milijonų laipsnių temperatūros medžiagą.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Šiais požiūriais yra pranašesni energijos šaltiniai, pagrįsti lengvųjų branduolių sintezės metu išsiskiriančia energija. Vandenilio ir jo sunkiųjų izotopų gamtoje yra labai daug. Tačiau nėra paprasta sukurti energetiškai naudingą valdomą branduolinės sintezės reakciją. Perspektyviausia yra sunkiųjų vandenilio izotopų deuterio ir tričio virtimo heliu reakcija. Deja, paaiškėjo, kad šis energijos šaltinis yra už devynių užraktų – branduolinė sintezė vyksta tik pakaitinus deuterio ir tričio mišinį iki maždaug 100 milijonų laipsnių. Todėl tokia reakcija ir vadinama termobranduoline sinteze. Iškyla problema, kur ir kaip įkaitinti ir išlaikyti milijonų laipsnių temperatūros medžiagą.
- Dabar jungtinėmis daugelio šalių (ES, Indija, Japonija, Kinija, Rusija, Pietų Korėja ir JAV - nuo 2006 metų) jėgomis kuriamas tarptautinis termobranduolinis reaktorius (ITER -angl. International Thermonuclear Experimental Reactor, lotin. - kelias), kuriame tik apie 2027 m. numatoma uždegti valdomą termobranduolinę reakciją. Pramoninį termobranduolinį reaktorių planuojama sukurti tik apie 2050 metus.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Todėl artimiausius dešimtmečius perspektyviausia išlieka branduolinė energetika. Saugūs, patikimi, moderniški branduoliniai reaktoriai (kaip ir atsinaujinančių energijos šaltiniu pagrindu veikiantys energijos generatoriai) pamažu skverbiasi ne tik į elektros energetiką, bet ilgainiui daugelyje ūkio šakų jie pakeis tradicinius energijos šaltinius.

Įvadas. Branduolinė energetika

- Todėl artimiausius dešimtmečius perspektyviausia išlieka branduolinė energetika. Saugūs, patikimi, moderniški branduoliniai reaktoriai (kaip ir atsinaujinančių energijos šaltiniu pagrindu veikiantys energijos generatoriai) pamažu skverbiasi ne tik į elektros energetiką, bet ilgainiui daugelyje ūkio šakų jie pakeis tradicinius energijos šaltinius.
- Ignalinos atominėje elektrinėje (1983-2009) veikė du vieni galingiausių pasaulyje branduoliniai reaktoriai, kurių galingumas (1500 MW kiekvieno) viršyjo Lietuvos elektros energijos poreikius.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos raida sąlygiškai gali būti suskirstyta į kelis pagrindinius etapus:

- 1942–1954 metai: fizikiniai eksperimentai ir pirmieji eksperimentiniai branduoliniai reaktoriai.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos raida sąlygiškai gali būti suskirstyta į kelis pagrindinius etapus:

- 1942–1954 metai: fizikiniai eksperimentai ir pirmieji eksperimentiniai branduoliniai reaktoriai.
- 1954–1960 metai: pramoninio eksperimento periodas. JAV, D. Britanijoje, Rusijoje ir Prancūzijoje paleidžiami energetiniai blokai.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos raida sąlygiškai gali būti suskirstyta į kelis pagrindinius etapus:

- 1942–1954 metai: fizikiniai eksperimentai ir pirmieji eksperimentiniai branduoliniai reaktoriai.
- 1954–1960 metai: pramoninio eksperimento periodas. JAV, D. Britanijoje, Rusijoje ir Prancūzijoje paleidžiami energetiniai blokai.
- 1960–1968 metai: 12 energetinių blokų devyniose šalyse elektrinė galia priartėja prie 10000 MW. Šalys pasirenka atominės energetikos plėtros kryptis (reaktorių tipus, šilumnešius, lėtiklius, reaktorių konstrukcijas).

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos raida (pratęsimas):

- 1968–1986 metai: audringos branduolinės energetikos plėtros periodas. Projektuojami supergalingi energetiniai blokai Prancūzijoje, Rusijoje, Japonijoje, 30 šalių veikia per 400 energetinių blokų, kurių bendra elektrinė galia siekia $28 \cdot 10^4$ MW.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos raida (pratęsimas):

- 1968–1986 metai: audringos branduolinės energetikos plėtros periodas. Projektuojami supergalingi energetiniai blokai Prancūzijoje, Rusijoje, Japonijoje, 30 šalių veikia per 400 energetinių blokų, kurių bendra elektrinė galia siekia $28 \cdot 10^4$ MW.
- 1986 metai: penktojo periodo pradžia. Po Černobylio atominės elektrinės katastrofos 1986 m. balandžio 26 d. atominių elektrinių statyba šiek tiek sulėtėjo, labai sugriežtėjo reikalavimai projektavimo, eksploatacijos darbų kokybei, personalo kvalifikacijai. Branduolinės energetikos plėtra pristabdyta Švedijoje, Vokietijoje, JAV. Tuo tarpu Prancūzijoje, Anglijoje, Japonijoje ir toliau statoma nemažai atominių elektrinių. Prancūzijos atominės elektrinės pagamina daugiau nei 70% šaliai reikalingos elektros energijos. Po 2011 metų žemės drebėjimo Japonijoje šioje šalyje taip nutarta atsisakyti branduolinės energetikos (gamino 30% elektros energijos).

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos fizikinis pagrindas – branduolio fizika. Branduolio fizikos pradžia laikytinas radioaktyvumo atradimas: A. A. Bekerelis (A. H. Becquerel, 1852–1908) 1896 m.
Galima išskirti keletą branduolio fizikos raidos periodų, kurių kiekvienas prasidėdavo kokiu nors labai svarbiu atradimu.

- Pirmasis periodas (1896–1912 m.) truko nuo radioaktyvumo atradimo iki atomo sandaros ištyrimo. Nustatyti radioaktyviojo skilimo dėsniai, aptikta apie 30 radioaktyviųjų elementų, ištirta α ir β spindulių kilmė.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos fizikinis pagrindas – branduolio fizika. Branduolio fizikos pradžia laikytinas radioaktyvumo atradimas: A. A. Bekerelis (A. H. Becquerel, 1852–1908) 1896 m.

Galima išskirti keletą branduolio fizikos raidos periodų, kurių kiekvienas prasidėdavo kokiu nors labai svarbiu atradimu.

- Pirmasis periodas (1896–1912 m.) truko nuo radioaktyvumo atradimo iki atomo sandaros ištyrimo. Nustatyti radioaktyviojo skilimo dėsniai, aptikta apie 30 radioaktyviųjų elementų, ištirta α ir β spindulių kilmė.
- Antrasis periodas (1913–1918 m.) truko nuo atomo branduolio atradimo iki pirmosios branduolinės reakcijos.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolinės energetikos fizikinis pagrindas – branduolio fizika. Branduolio fizikos pradžia laikytinas radioaktyvumo atradimas: A. A. Bekerelis (A. H. Becquerel, 1852–1908) 1896 m.
Galima išskirti keletą branduolio fizikos raidos periodų, kurių kiekvienas prasidėdavo kokiu nors labai svarbiu atradimu.

- Pirmasis periodas (1896–1912 m.) truko nuo radioaktyvumo atradimo iki atomo sandaros ištyrimo. Nustatyti radioaktyviojo skilimo dėsniai, aptikta apie 30 radioaktyviųjų elementų, ištirta α ir β spindulių kilmė.
- Antrasis periodas (1913–1918 m.) truko nuo atomo branduolio atradimo iki pirmosios branduolinės reakcijos.
- Trečiasis periodas (1919–1932 m.) - nuo pirmosios branduolinės reakcijos iki neutrono atradimo: Dž. Čedvikas (J. Chadwick, 1891–1974), 1932 m.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolio fizikos raidos periodai (pratęsimas):

- Ketvirtasis periodas (1932–1939 m.) – nuo neutrono iki branduolių dalijimosi reakcijos atradimo. Šiuo laikotarpiu buvo atrastas pozitronas - pirmoji antidalelė (1932 m.), dirbtinis radioaktyvumas (1934 m.), mezonai, pradedami detaliai tirti kosminiai spinduliai.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolio fizikos raidos periodai (pratęsimas):

- Ketvirtasis periodas (1932–1939 m.) – nuo neutrono iki branduolių dalijimosi reakcijos atradimo. Šiuo laikotarpiu buvo atrastas pozitronas - pirmoji antidalelė (1932 m.), dirbtinis radioaktyvumas (1934 m.), mezonai, pradedami detaliai tirti kosminiai spinduliai.
- Penktasis periodas (nuo 1939 m.) - nuo urano branduolio dalijimosi reakcijos atradimo iki galingos branduolinės energetikos, atominio ir vandenilinio ginklo sukūrimo, didelių pasiekimų elementariųjų dalelių savybių ir sandaros (partonai, kvarkai) tyrimuose.

Įvadas. Branduolinė energetika

Branduolio fizikos raida labai glaudžiai susijusi ir persipynusi su kitais XIX amžiaus pabaigos – XX a. pirmosios pusės revoliuciniais atradimais ir pasiekimais kitose fizikos srityse: nuo Rentgeno spindulių 1895 m. ir elektrono atradimo (Dž. Dž. Tomsonas) 1897 m., kvantų hipotezės ir fotono sąvokos įvedimo iki atomo sandaros nustatymo ir aprašymo, specialiosios ir bendrosios reliatyvumo teorijų, kvantinės mechanikos ir kvantinės elektrodinamikos sukūrimo. Daugelis šių fizikos atradimų, pvz., Rentgeno spinduliai, Einšteino energijos ir masės sąryšis ($E = mc^2$), kvantavimas ir kt., glaudžiai siejasi su branduolio fizika ir branduoline energetika. Todėl paskaitose, einant link branduolinės energetikos pagrindų, pateikiami ir kvantinės mechanikos elementai, atomo teorijos santrauka, o taip pat su branduoline energetika susiję branduolinės spinduliuotės taikymo, sąveikos su medžiaga, biologinio poveikio bei dozimetrijos pagrindai.

Įvadas. Branduolinė energetika

Antroje paskaitų dalyje bus detaliau analizuojama branduolinių reaktorių veikimas, valdomos termobranduolinės sintezės problemos, trumpai apibūdinami kosminiai spinduliai, pateikiami elementariųjų dalelių fizikos elementai, branduolio fizikos sąsaja su kosmologija ir astrofizikos problemomis, Visatos raidos ir žvaigždžiu evoliucijos pagrindiniai bruožai. Taigi šis kursas turi ne tik praktinį, bet ir pažintinį pasaulėžiūrinį aspektus.

Turinys

Turinys

Atomo sandara. Atomo modeliai

Atomas susideda iš elektronų ir branduolio. Branduolio viduje yra protonų ir neutronų.
Atomo viduje veikia labai stiprios elektrinės jėgos, kurios užtikrina atomo stabilumą. Elementarioji dalelė elektronas turi absoliutiniu didumu mažiausią gamtoje aptinkamą laisvą vienos rūšies krūvį, kuris vadinamas neigiamuoju, o protonas – tokio paties dydžio teigiamąjį krūvį. Ligi šiol nėra žinoma elektros krūvio prigimtis, o krūvio ženklo priskyrimas yra sąlyginis. (Pavyzdžiui, elektrono krūvį galima būtų vadinti teigiamuoju, o protono – neigiamuoju.) Betgi yra svarbi įelektrintųjų kūnų savybė: kūnai, turintys vienodo ženklo elektros krūvius, vienas kitą stumia, o turintys priešingo ženklo krūvius – traukia vienas kitą.
Elektros krūviams galioja tvermės dėsnis, teigiantis, kad bet kokio elektriškai izoliuoto kūno elektros krūvių algebrinė suma nekinta, kad ir kokie procesai vyktų tame kūne.

Atomo sandara. Atomo modeliai

Elektrono krūvis mums įprasto makropasaulio požiūriu yra labai mažas vienetas, todėl SI sistemoje įvedamas daug didesnis vienetas – kulonas (C; vienas kulonas lygus $6,24 \cdot 10^{18}$ elektronų arba protonų krūviui), pavadintas prancūzų mokslininko Š. Kulono (Coulomb) vardu, kuris 1785 m. paskelbė pagrindinį įelektrintų kūnų sąveikos dėsnį (vadinamą Kulono vardu):

Kulono dėsnis

$$F = k_c \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1)$$

Čia q_1 ir q_2 yra dviejų sąveikaujančių kūnų krūviai, išreikšti kulonais, r – atstumas tarp kūnų, o k_c – koeficientas, nusakantis sąveikos jėgos F stiprumą. Kulono koeficientas

Kulono koeficientas

$$k_c = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2} \quad (2)$$

Atomo sandara. Atomo modeliai

(čia $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m – elektrinė konstanta) yra labai didelis. Elektros jėgos yra daug kartų stipresnės už visuotinės traukos (gravitacinę) jėgą, kuri taip pat priklauso nuo atstumo (yra atvirkščiai proporcinga atstumo kvadratui) ir turi panašų į formulę (1) pavidalą ($F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$, čia m_1 ir m_2 - dviejų sąveikaujančių kūnų masės). Pastarosios stiprumą nusakanti gravitacinė konstanta $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ N m^2/kg^2 yra labai mažas dydis. Gravitacinė sąveika tarp mikropasaulio dalelių yra tokia silpna, kad atomo ir branduolio fizikoje nevaidina jokio vaidmens.

Atomo sandara. Atomo modeliai

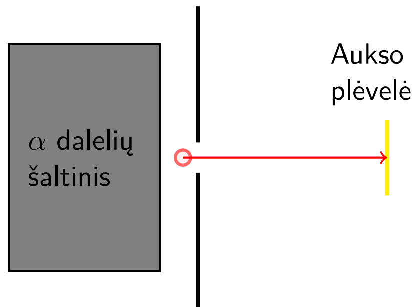
Dėl tarpusavio traukos teigiamą ir neigiamą kruvį turinčios dalelės, traukdamos vienos kitas, stengiasi sudaryti neutralias sistemas, kurių krūvių algebrinė suma lygi nuliui. Paprasčiausia tokia sistema - atomas, kuriame elektronų skaičius lygus atomo branduolyje esančių protonų skaičiui. Atomo viduje veikia labai stiprios elektrinės jėgos, bet atomo išorėje jos beveik nepasireiškia, nes teigiamo branduolio krūvio veikimą kompensuoja neigiamas elektronų krūvių veikimas. Tad atomas elgiasi kaip neutrali - neturinti krūvio dalelė. Pastebėsime, kad elektriškai neutraliame kūne pasinaikina ne teigiami ir neigiami krūviai, bet jų veikimas į išorinius kūnus.

Atomo sandara. Atomo modeliai

Pirmosios elementariosios dalelės elektrono atradėjas Dž. Dž. Tomsonas XIX a. pabaigoje pasiūlė ir pirmąjį atomo modelį. Pagal Tomsoną, teigiamas krūvis atome yra pasiskirstęs vienodu tankiu, o neigiami elektronai jame išsidėstę kaip razinos kekse. Tačiau Tomsono mokinio E. Rezerfordo (E. Rutherford) atlikti bandymai paneigė šį modelį. Rezerfordas pasiūlė zonduoti atomus radžio skleidžiamomis α dalelėmis. Šios dalelės – visiškai jonizuoti helio atomai, kurių masė apytiksliai 7000 kartų didesnė už elektrono masę, o teigiamas krūvis lygus dvigubam elektrono krūvio moduliui. Radžio skleidžiamomis α dalelėmis, kurių greitis labai didelis, maždaug $1/15$ šviesos greičio, buvo apšaudoma labai plona aukso plėvelė ir matuojamas α dalelių judėjimo krypties pasikeitimas.

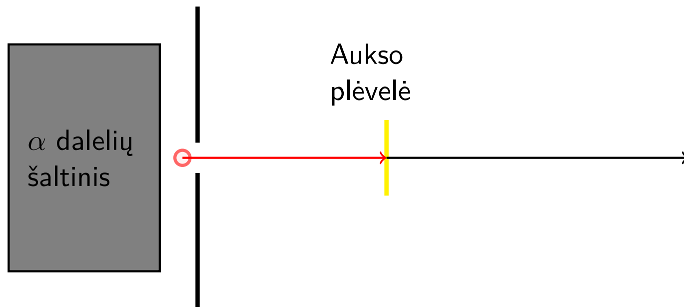
Atomo sandara. Atomo modeliai

E.Rezerfordo bandymai



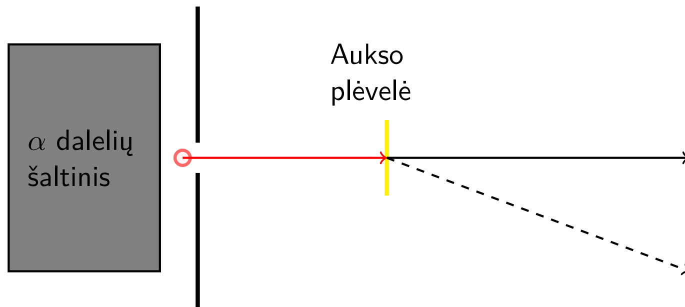
Atomo sandara. Atomo modeliai

E.Rezerfordo bandymai



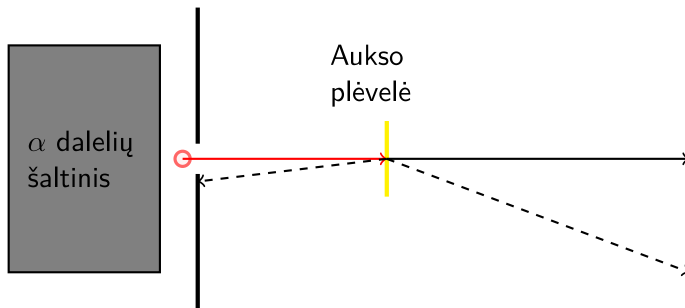
Atomo sandara. Atomo modeliai

E.Rezerfordo bandymai



Atomo sandara. Atomo modeliai

E.Rezerfordo bandymai



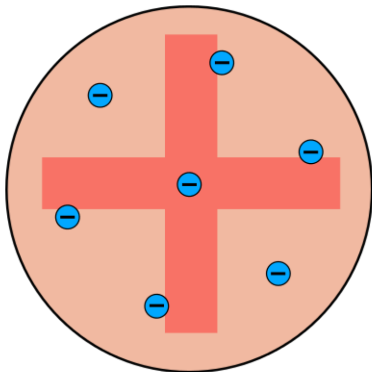
Atomo sandara. Atomo modeliai

Dauguma α dalelių praskrosdavo ploną aukso plėvelę beveik nepakeisdamos savo judėjimo krypties. Tačiau visiškai netikėtai paaiškėjo, kad nedidelis α dalelių skaičius (apytiksliai viena iš dviejų tūkstančių) nukrypdavo didesniu negu 90° kampu, o maždaug viena iš 10000 atšokdavo atgal. Darant prielaidą, kad teigiamas krūvis yra pasiskirstęs visame atome (kaip Tomsono atomo modelyje), stebimas efektas yra beveik taip pat netikėtas, kaip ir tai, kad į ploną popieriaus skiautelę iššautas patrankos sviedinys smogtų atgal. Iš tikrųjų, jėga veikianti α dalelę tiek atomo matmenų elektringo rutulio paviršiuje, tiek ir jo viduje yra per maža, kad pastebimai iškreiptų didelės energijos α dalelės trajektoriją, o susidūrimas su elektronu, kurio masė maždaug 7000 kartų mažesnė negu α dalelės masė, taip pat negalėjo taip stipriai iškreipti jos judėjimo.

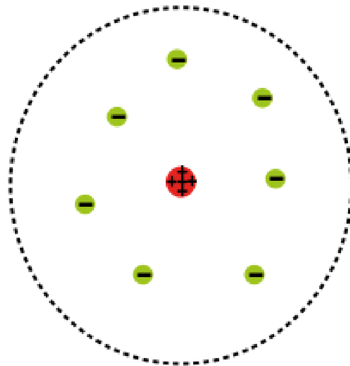
Atomo sandara. Atomo modeliai

Remdamasis šiais bandymais, E. Rezerfordas iškėlė hipotezę, kad atomas yra sudarytas iš mažo masyvaus branduolio, į kurį pataikiusi α dalelė ir atšoka atgal, ir elektronų debesėlio. Kadangi atomas yra neutralus, tai teigiamas branduolio krūvis turi būti lygus neigiamo visų atomo elektronų krūvio absoliutiniam didumui, o kad elektronai nenukristų ant branduolio, jie turi suktis aplink jį. Toks planetinis atomo modelis paaiškina α dalelių išsklaidymo rezultatus, tačiau jis negali paaiškinti atomo egzistavimo, jo pastovumo. Juk elektronai, judėdami orbitomis su dideliu pagreičiu, pagal elektrodinamikos dėsnius turi skleisti elektromagnetines bangas, per labai trumpą laiką netekti energijos ir nukristi ant branduolio. O iš tikrųjų atomai yra pastovūs ir nesužadinti gali egzistuoti neribotai ilgai, visiškai neskleisdami elektromagnetinių bangų. Tai paaiškino tik kvantinė teorija.

Atomo sandara. Atomo modeliai



Tomsono atomas.Elektronai išsidėstę tolygiai kaip razinos kekse.

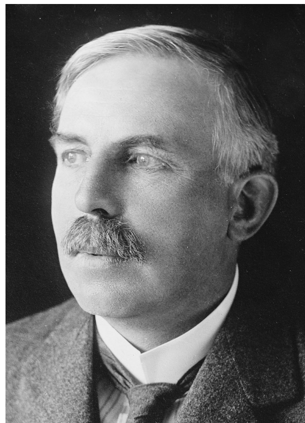


Rezerfordo atomas. Mažas masyvus teigiamas branduolys apsuptas elektronų debesėlio.

Atomo sandara. Atomo modeliai



Dž. Dž. Tomsonas. 1906 Nobelio premija.



E. Rezerfordas. 1908 Nobelio premija.

Atomo sandara. Atomo modeliai

E.Rezerfordas, suskaičiuodamas išsklaidytas įvairiais kampais α daleles, įvertino, kad atomo branduolys yra maždaug 10^{-14}–10^{-15} m skersmens, kai tuo tarpu paties atomo matmenys yra 10^{-10} m eilės, t.y. apie 10–100 tūkstančių kartų didesni už branduolio matmenis. Tačiau praktiškai visa atomo masė yra sukoncentruota jo branduolyje. Vėliau buvo nustatyta, kad teigiamas branduolio krūvis, išmatuotas elektrono krūvio absoliutiniais dydžiais, yra lygus atitinkamo cheminio elemento eilės numeriui periodinėje lentelėje.

Atomo sandara. Atomo modeliai

Atomo stabilumo problemą 1913 m. ėmėsi spręsti danų fizikas Nilsas Boras (Bohr). Jis suformulavo dvi pagrindines elektronų elgesio atomuose taisykles (postulatus):

- Atominė sistema gali būti tik tam tikrose stacionariose arba kvantinėse būsenose, kurių kiekvieną atitinka tam tikra energija E_n; stacionariose būsenose atomas nespinduliuoja.
- Pereidamas iš vienos stacionariosios būsenos, kur jo energija E_2 didesnė, į mažesnės energijos E_1 būseną, atomas išspinduliuoja elektromagnetinės energijos kvantą (fotoną), kurio energija

Išspinduliuoto fotono energija

$$h\nu = E_2 - E_1, \tag{3}$$

čia $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, ν - šviesos dažnis. Antra vertus, sugėręs fotoną $h\nu$, atomas gali būti sužadintas iš būsenos su energija E_1 į būseną su energija $E_2 > E_1$.

Atomo sandara. Atomo modeliai

Spinduliavimas ir sugertis



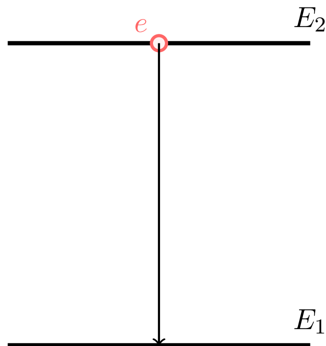


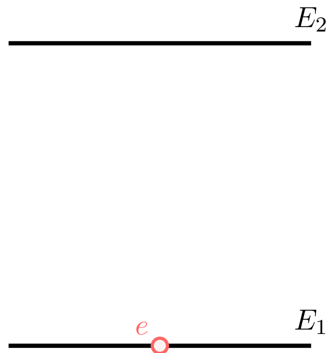




Atomo sandara. Atomo modeliai

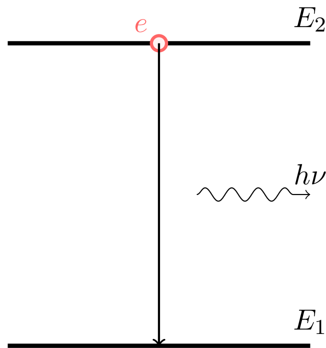
Spinduliavimas ir sugertis

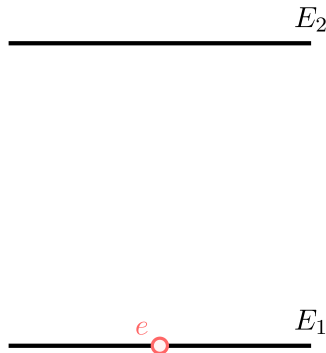




Atomo sandara. Atomo modeliai

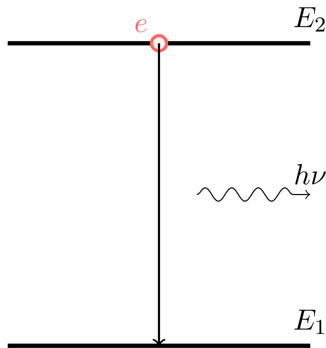
Spinduliavimas ir sugertis

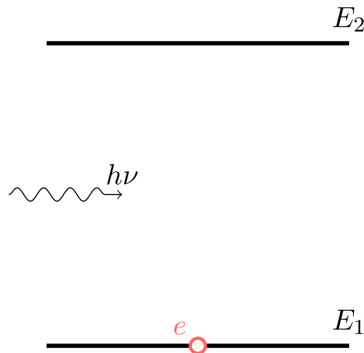




Atomo sandara. Atomo modeliai

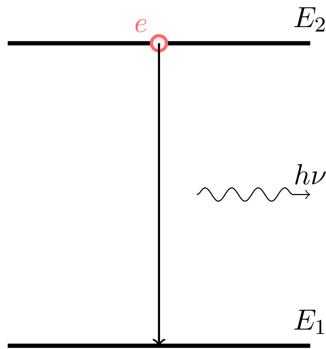
Spinduliavimas ir sugertis

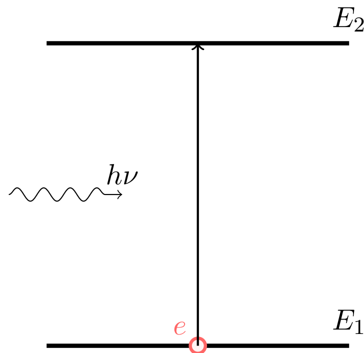




Atomo sandara. Atomo modeliai

Spinduliavimas ir sugertis





Turinys

Vandenilio atomas

Savo postulatus Boras taikė paprasčiausio vandenilio atomui ir nagrinėjo paprastas apskritimines orbitas. Įsitikinęs, kad Planko konstanta $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$ J·s yra svarbi atomo teorijoje ir pastebėjęs, kad jos dimensija sutampa su judesio kiekio momento dimensija, Boras padarė prielaidą, kad judesio kiekio momentas yra kvantuotas ir kartotinis $\hbar$, arba judesio kiekio ir orbitos ilgio sandauga yra sveikas skaičius n padaugintas iš Planko konstantos h.

Iš šios prielados sekė orbitų spindulių r_n, elektronų greičių stacionariose orbitose v_n ir stacionariųjų būsenų E_n kvantavimo išraiškos:

Kvantavimas

$$r_n = a_0 n^2, \; v_n = \frac{v_0}{n}, \; E_n = -\frac{E_0}{2n^2}, \tag{4}$$

čia $n = 1, 2, 3, ...$ yra orbitos eilės numeris, vėliau pavadintas pagrindiniu kvantiniu skaičiumi, o a_0, v_0 ir E_0 – atomo ilgio, greičio ir energijos vienetai.

Vandenilio atomas

Ilgio, greičio ir energijos vienetai

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{k_c m_e e^2} = 5,3 \cdot 10^{-11}\mathrm{m} \ \left(k_c = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right) \quad (5)$$

$$v_0 = k_c \frac{e^2}{\hbar} = \alpha c = 2,19 \cdot 10^6 \ \mathrm{m/s}, \quad (6)$$

$$E_0 = 2Ry = k_c \frac{e^2}{a_0} = 4,36 \cdot 10^{-18} \ \mathrm{J} = 27.2 \ \mathrm{eV}. \quad (7)$$

Šiose formulėse $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C –elektrono ktūvis, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg – elektrono masė, $k_c = 9 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2 – Kulono konstanta, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m – elektrinė konstanta, α ir Ry (kita skaidrė)

Vandenilio atomas

α ir Ry

$$\alpha = k_c \frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137} = 7,297 \cdot 10^{-3}, \tag{8}$$

$$1 Ry = \frac{1}{2} E_0 = k_c \frac{e^2}{2a_0} = 2,168 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV} \tag{9}$$

– atitinkamai vadinamoji smulkiosios sandaros konstanta ir rydbergas – nesisteminis energijos vienetas. $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – šviesos greitis vakuume, o eV – energijos vienetas elektronvoltas (1eV$= 1,6 \cdot 10^{-19}$ J) lygus energijai, kurią įgyja elektronas, pralėkęs vieno volto potencialų skirtumą. Spektroskopijoje vietoje rydbergo dažniau naudojama Rydbergo konstanta $R = Ry/h = 3,28 \cdot 10^{15}$ Hz arba $R' = R/c = 1,10 \cdot 10^7$ m^{-1} – dydžiai matuojami dažnio arba atvirkštiniais ilgio vienetais. Tiksliau $R' = 1,0973731568549 \cdot 10^7$ m^{-1} – vienas iš tiksliausiai matuojamų fizikinių dydžių.

Vandenilio atomas

Tuo būdu iš Boro teorijos seka, kad vandenilio atomo skleidžiamų bangų galimi dažniai apskaičiuojami pagal formulę

Dažniai

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right), \quad k > n, \tag{10}$$

o atitinkami bangų ilgiai

Bangų ilgiai

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = R'\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) \tag{11}$$

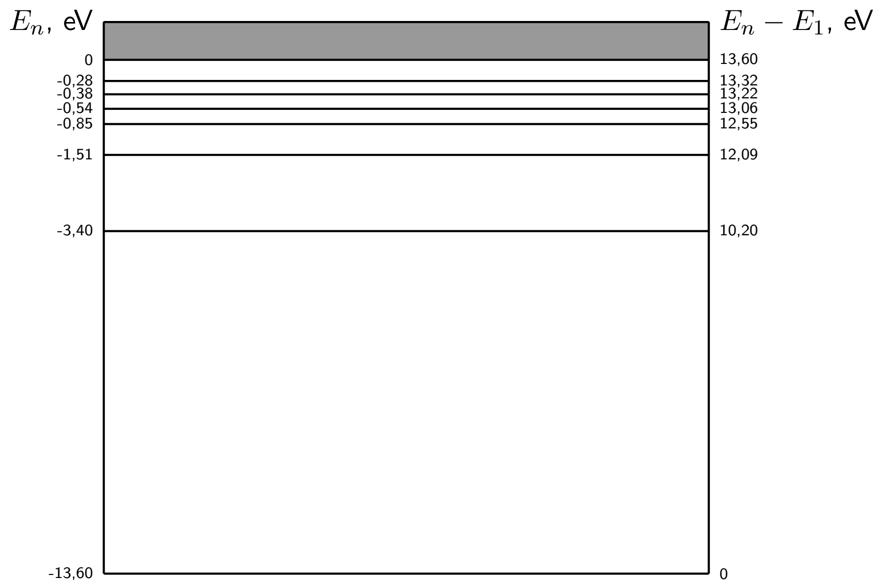
Vandenilio atomo skleidžiamų bangų dažniai sudaro serijas, kurių kiekvieną atitinka tam tikra apatinio energijos lygmens pagrindinio kvantinio skaičiaus n vertė ir skirtingos skaičiaus $k > n$ vertės.

Vandenilio atomas

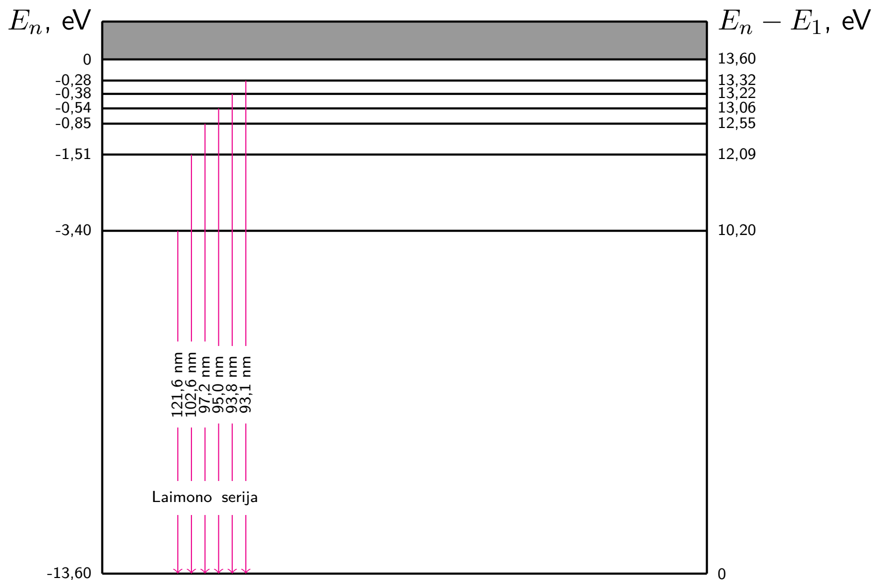
Šuoliai iš aukštesnių lygmenų į žemiausią – pagrindinę būseną su pagrindiniu kvantiniu skaičiumi $n = 1$ sudaro Laimano seriją. Šios spektrinės linijos patenka į nematomą ultravioletinę spektro sritį. Šuoliai iš lygmenų su $k > 2$ į antrą energijos lygmenį su $n = 2$ sudaro Balmerio seriją. Raudona, žalia ir dvi mėlynos linijos regimajame vandenilio spektre atitinka šuolius $E_3 \to E_2$, $E_4 \to E_2$, $E_5 \to E_2$ ir $E_6 \to E_2$. Šuoliai į trečiąjį ($n = 3$) energijos lygmenį sudaro Pašeno seriją, patenkančią į infraraudonosios spinduliuotės sritį ir t.t.

Sugerdamas šviesą atomas, priešingai spinduliavimui, peršoka iš žemesnių energijos lygmenų į aukštesnius. Jis sugeria tų pačių dažnių bangas, kurias skleidžia spinduliuodamas.

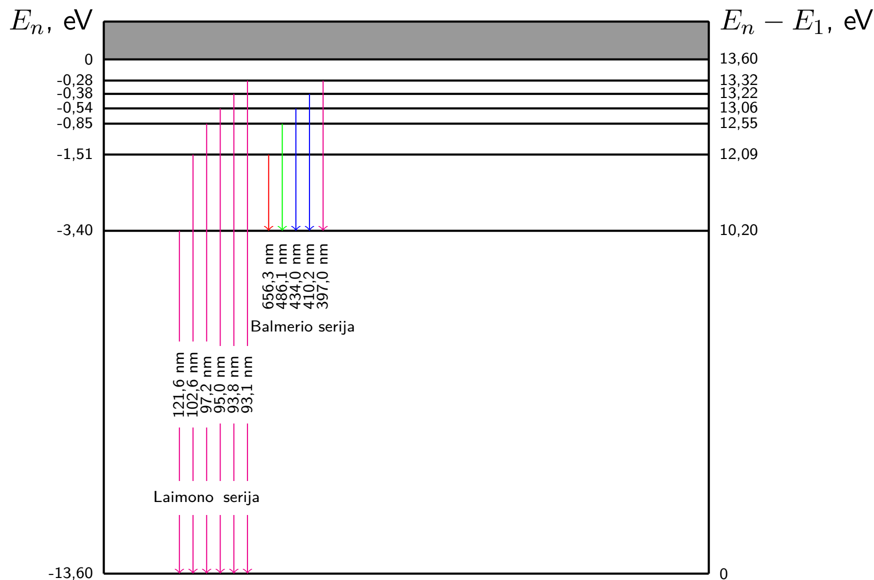
Vandenilio atomas



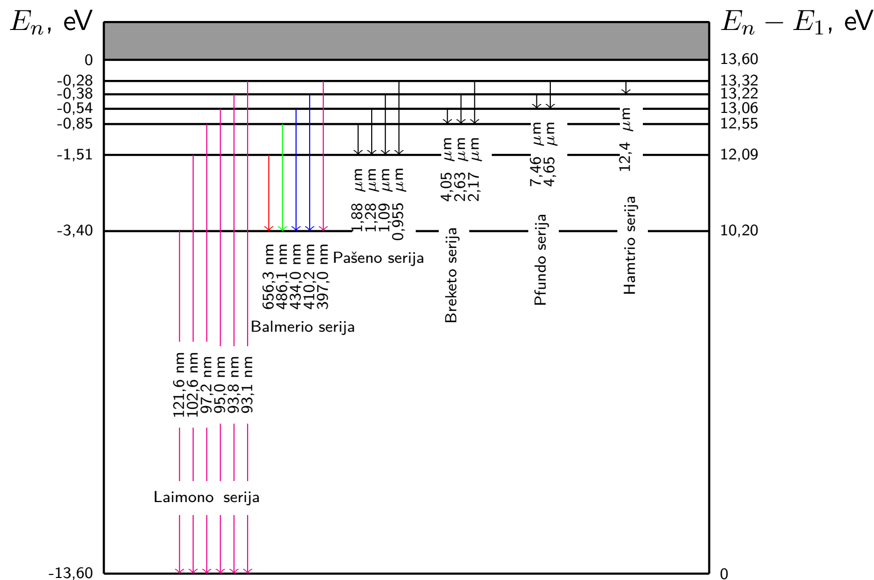
Vandenilio atomas



Vandenilio atomas



Vandenilio atomas



Vandenilio atomas

Verta pastebėti, kad atominis laiko ir atominis dažnio vienetai yra atitinkamai

Atominiai laiko ir dažnio vienetai

$$\tau_0 = \frac{a_0}{v_0} = 2,42 \cdot 10^{-17}\ \mathrm{s\ ir}\ \nu_0 = \frac{1}{\tau_0} = 4,13 \cdot 10^{16}\ \mathrm{Hz}. \tag{12}$$

Elektrono apsisukimo n-tojoje orbitoje periodas

Apsisukimo periodas

$$T = 2\pi\tau_0 n^3, \tag{13}$$

o klasikinio apsisukimo dažnis

Klasikinis apsisukimo dažnis

$$\nu_{kl} = \frac{\nu_0}{2\pi n^3} = \frac{2R}{n^3} = 6,6 \cdot 10^{15} \frac{1}{n^3}\ \mathrm{Hz}. \tag{14}$$

Vandenilio atomas

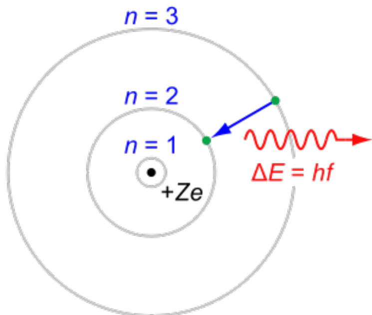
Pagal formulę (10) apskaičiuoti šuolių tarp artimų lygmenų su dideliais kvantiniais skaičiais k ir l spinduliuojamų bangų dažniai yra

Spinduliuojamų bangų dažnis

$$\nu_{kv} \approx \frac{2R(k-n)}{n^3} = \nu_{kl}(k-n), \; k > n > k-n. \tag{15}$$

Tai yra taip vadinamos kvantinės ir klasikinės teorijų atitikimo principas – šuolių tarp aukštų lygmenų metu atomų spinduliuojamų bangų dažniai yra kartotiniai klasikiniam elektrono dažniui Boro orbitoje.

Vandenilio atomas



Boro atomas. Atominė sistema gali būti tik tam tikrose stacionariose arba kvantinėse būsenose.



N. Boras. 1922 Nobelio premija.